

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Розглядається рішення задачі визначення параметрів режимів повної компенсації реактивної потужності для трифазної системи з лінійним несиметричним навантаженням. Дослідження, проведені за допомогою SimPowerSystems-моделі і методу деформованого багатогранника, показали, що в залежності від початкових умов для змінних оптимізацій, процес оптимізації може призводити до двох різних рішень. Основний режим повної компенсації характеризується істотним зменшенням втрат в системі. Другий же, додатковий режим повної компенсації може характеризуватися неприйнятними на практиці зростанням струмів і напруг в системі електропостачання. Бібл. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: реактивна потужність, компенсатор реактивної потужності, пошукова оптимізація, візуальна модель, трифазна система електропостачання.

Рассматривается решение задачи определения параметров режимов полной компенсации реактивной мощности для трехфазной системы с линейной несимметричной нагрузкой. Исследования, проведенные с помощью SimPowerSystems-модели и метода деформируемого многогранника, показали, что в зависимости от начальных условий для переменных оптимизации, процесс оптимизации может приводить к двум различным решениям. Основной режим полной компенсации характеризуется существенным уменьшением потерь в системе. Второй же, дополнительный режим полной компенсации может характеризоваться неприемлемыми на практике возрастаниями токов и напряжений в системе электроснабжения. Библ. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: реактивная мощность, компенсатор реактивной мощности, поисковая оптимизация, визуальная модель, трехфазная система электроснабжения.

Введение. Постановка проблемы и обоснование ее актуальности. Симметрирование токов и напряжений в трехфазных системах является одним из важнейших средств повышения качества электроснабжения и представляет собой актуальную задачу на современном этапе [1, 2]. Благодаря симметрированию уравниваются амплитуды токов в фидерах системы электроснабжения, что способствует равномерной загрузке источников электроэнергии. Кроме того, снижаются амплитуды токов в ЛЭП, что в свою очередь означает уменьшение потерь на передачу электроэнергии, а, следовательно, обеспечивается повышение коэффициента полезного действия [3]. Оптимальным во всех указанных отношениях является режим полной компенсации реактивной мощности, под которым будем подразумевать такой симметричный режим, при котором от источника потребляется исключительно активная мощность. Реактивная составляющая потребляемой от источника мощности при этом становится равной нулю, что возможно, когда от источника отбирается синусоидальный ток, совпадающий по фазе с синусоидой генерируемого источником синусоидального напряжения. Таким образом, в режиме полной компенсации реактивной мощности коэффициент мощности достигает максимального единичного значения [6]. Для трехфазной системы электроснабжения режим полной компенсации реактивной мощности должен быть распространен на все три источника электрической энергии одновременно.

Обзор последних публикаций по теме. Результаты решения задачи симметрирования не приводят к оптимальному режиму, и она может быть решена в пространстве линейных операторов [1, 2]. При решении задачи полной компенсации реактивной мощности к системе линейных уравнений добавляются условия полной компенсации реактивной мощности

в источниках, и эти условия являются нелинейными. Поэтому в [1, 2], равно как и в других источниках [3-5] эта задача не нашла полного разрешения. В общем случае решение задачи полной компенсации реактивной мощности при указанных условиях возможно лишь при помощи оптимизационных методов, что показано в [6]. Используемый в [6] метод поисковой оптимизации позволяет найти режимные параметры для случая полной компенсации реактивной мощности с помощью визуальной модели и метода деформируемого многогранника [7]. Такой общий подход открывает возможности исследования режимов компенсации реактивной мощности для систем электроснабжения любой конфигурации и вариации параметров сети и нагрузки.

Целью статьи является исследование режимов в трехфазной системе электроснабжения с линейной несимметричной нагрузкой для выявления неоднозначности решения задачи синтеза параметров компенсатора в режимах полной компенсации реактивной мощности.

Изложение оригинального материала статьи. Рассматривается обобщенная трехфазная система электроснабжения, приведенная на рис. 1.

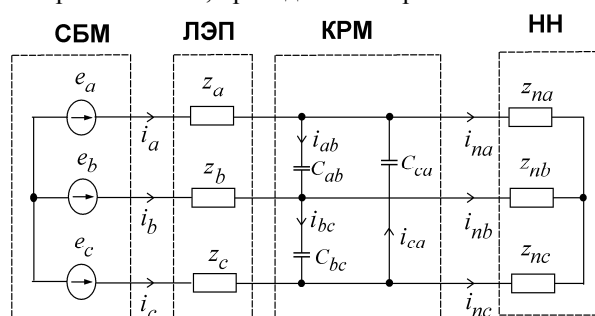


Рис. 1. Принципиальная схема обобщенной трехфазной системы электроснабжения

Сеть бесконечной мощности (СБМ) представлена источниками синусоидального напряжения e_a , e_b и e_c . Линии электропередачи (ЛЭП) в виде комплексных сопротивлений z_a , z_b и z_c подводят энергию к несимметричной нагрузке (НН) в виде звезды комплексных сопротивлений индуктивного характера z_{na} , z_{nb} и z_{nc} . Компенсатор реактивной мощности (КРМ) представлен конденсаторами C_{ab} , C_{bc} , C_{ca} , включаемыми параллельно нагрузке.

Определение емкостей этих конденсаторов представляет собой задачу синтеза параметров компенсатора при условии полной компенсации реактивной мощности.

Основной материал исследования. Решение поставленной задачи осуществим с использованием визуальной модели и поисковой оптимизации в расширении SimPowerSystem (SPS) системы компьютерной математики MATLAB. На рис. 2 изображена визуальная модель системы электроснабжения.

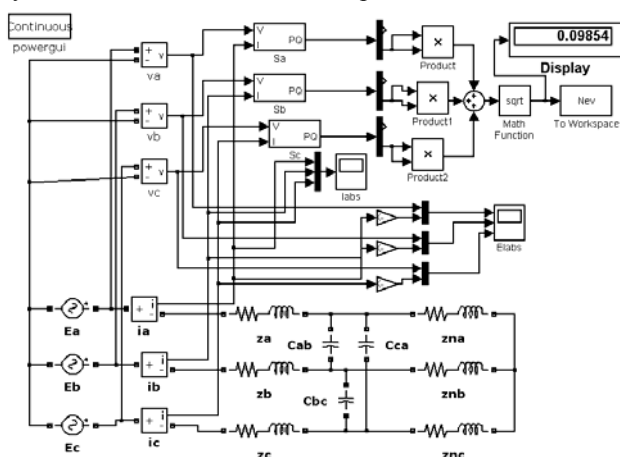


Рис. 2. Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения

Ее вид при использовании элементов библиотеки компонентов SimPowerSystem практически совпадает с изображением принципиальной схемы (рис. 1).

Дополнительно введены виртуальные измерители токов i_a , i_b и i_c в ЛЭП. Амплитуды напряжений источников приняты равными 100 В, частота напряжений – 50 Гц, $\omega = 100\pi$.

Комплексные сопротивления всех ЛЭП приняты равными $z_a = z_b = z_c = 0.1 + j\omega 0.001$ Ом. Комплексные сопротивления нагрузок: $z_{na} = (0.7 + j\omega 0.005)$ Ом; $z_{nb} = (1 + j\omega 0.01)$ Ом; $z_{nc} = (2 + j\omega 0.04)$ Ом. При указанных параметрах режим питания несимметричной нагрузки характеризуется несимметричными токами, протекающими в ЛЭП:

$$i_a = 19.156 - j24.99 = 31.494e^{j(-52.536^\circ)} \text{ A};$$

$$i_b = -25.84 + j17.11 = 30.995e^{j(146.495^\circ)} \text{ A};$$

$$i_c = 6.69 + j7.89 = 10.342e^{j(49.705^\circ)} \text{ A}.$$

Виртуальные измерители активных и реактивных мощностей, определяющие режим источников, дают следующие показания для полных мощностей, отдаваемых источниками:

$$S_a = (957.82 + j1249.88) \text{ ВА};$$

$$S_b = (-94.75 + j1546.84) \text{ ВА};$$

$$S_c = (174.35 + j486.81) \text{ ВА}.$$

Эти показатели определяют следующие значения коэффициентов мощности для каждого из источников электроэнергии:

$$\cos \varphi_a = 0.608; \cos \varphi_b = -0.061; \cos \varphi_c = 0.337.$$

Режим задачи для первого режима полной компенсации реактивной мощности осуществляется с использованием визуальной модели, которая дополняется вычислительными элементами для определения значения целевой функции. Выбор самой целевой функции диктуется постановкой задачи полной компенсации реактивной мощности для каждого из источников электроэнергии.

Выражение для целевой функции представляет собой шаровую метрику [8], составленную из реактивных мощностей каждого источника электроэнергии:

$$N = \sqrt{Q_a^2 + Q_b^2 + Q_c^2}$$

Это значение вычисляется в самой модели (рис. 2), где от виртуальных PQ-измерителей отбираются лишь реактивные мощности, которые далее возводятся в квадрат, суммируются, и из суммы извлекается квадратный корень, как это показано на модели.

Полученное значение целевой функции с помощью виртуального блока To WorkSpace передается далее в рабочее пространство системы MATLAB, откуда оно становится доступным для программных модулей.

Первый программный модуль (рис. 3,а) представляет собою главную программу. Переменными оптимизации являются C_{ab} , C_{bc} , C_{ca} , представляющие величины емкостей компенсатора. Эти переменные в главной программе объявлены глобальными переменными. Далее следует вызов встроенной функции безусловной нелинейной оптимизации `fminsearch()` по методу деформируемого многогранника [8]. В качестве фактических параметров достаточно указать два параметра: имя файл-функции, обеспечивающей вычисление значения целевой функции, и массив начальных значений переменных оптимизации.

```
global Cab Cbc Cca Nst MN XX
Nst=1
Y=fminsearch('func_s3fnesim',[1 1 1])
```

а

```
function Nev=func_s3fnesim(x)
global Cab Cbc Cca Nst MN XX
Cab=abs(x(1)*1E-6);
Cbc=abs(x(2)*1E-6);
Cca=abs(x(3)*1E-6);
sim s3fnesim2
x
Nev
Nst=Nst+1
```

б

Рис. 3. Программные коды: а – главной программы; б – файл-функции

Текст второго программного модуля приведен на рис. 3,б. Первая строка повторяет объявление глобальных переменных. Далее размещены операторы, выражающие действительные значения емкостей компенсатора через элементы массива переменных

оптимизации. Целесообразно использовать масштабный коэффициент, переводящий значения x переменных оптимизации, выраженные в микрофарадах, в значения емкостей C_{ab} , C_{bc} , C_{ca} , выраженные в фарадах. Тем самым обеспечивается возможность избежать оптимизации на множестве переменных оптимизации, значения которых приближаются к нулю.

После масштабирования следует оператор `sim`, вызывающий на исполнение саму визуальную модель системы электроснабжения с компенсатором. Для рассматриваемой линейной системы оказывается достаточным произвести прогон модели в течение лишь одного периода питающего напряжения, поскольку для линейных SPS-моделей по умолчанию осуществляется предварительный расчет установившегося режима. В процессе прогона SPS- модели в течение периода осуществляется нахождение значения целевой функции, используемое далее самой программой оптимизации.

Выбор начальных значений переменных оптимизации оказывает влияние на ход процесса оптимизации. В первом варианте в качестве начальных значений переменных оптимизации вектора начальных значений был принят вектор $x = [1, 1, 1]$, то есть емкости конденсаторов приняты в начале оптимизации $C_{ab} = C_{bc} = C_{ca} = 1$ мкФ.

Такой выбор объясняется стремлением начать оптимизацию с изображающей точки траектории процесса оптимизации, отстоящей от исходного несимметричного режима на незначительном расстоянии. Действительно, подключение столь небольших емкостей не оказывает существенного влияния на исходный режим, и при этом обеспечивается плавность перехода от исходного режима к процессу оптимизации. В этом случае процесс оптимизации завершился после 268 прогонов SPS-модели и привел решение к следующим значениям емкостей конденсаторов компенсатора:

$$C_{ab} = 562.2 \text{ мкФ}; C_{bc} = 182.3 \text{ мкФ}; C_{ca} = 34.4 \text{ мкФ}.$$

Амплитуды токов в ЛЭП при этом стали равными:

$$I_{am} = I_{bm} = I_{cm} = 7.754 \text{ А}.$$

Таким образом, режим полной компенсации реактивной мощности позволил снизить активные потери в фазах А, В, С соответственно в 16.5, 2.16 и 21.78 раз по сравнению с несимметричным режимом.

Ход процесса оптимизации при нахождении первого режима наглядно отражает зависимость величины N целевой функции от порядкового номера k вызова SPS-модели на прогон (рис. 4). Здесь отчетливо видны интервалы графика, которые характеризуются незначительными изменениями целевой функции, а именно:

- а) интервал $k = 0 \dots 40$;
- б) интервал $k = 60 \dots 180$;
- в) интервал $k = 230 \dots 268$.

Очевидно, что первый интервал $k = 0 \dots 40$ обусловлен нарастанием значений емкостей компенсатора от незначительных единичных начальных значений до значений, при которых они начинают существенно влиять на снижение реактивной мощности в системе электроснабжения.

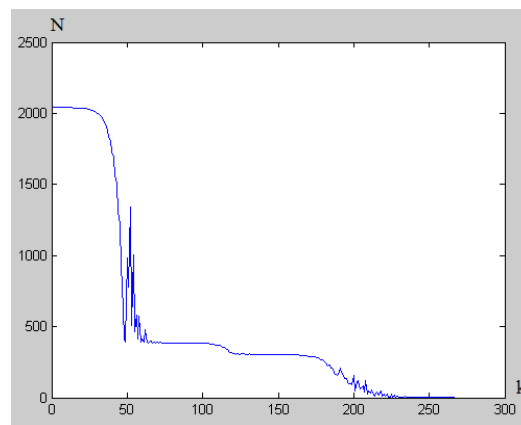


Рис. 4. Зависимость целевой функции N от номера шага k оптимизации при нахождении основного режима полной компенсации

Второй интервал, по всей видимости, обусловлен особенностями многомерной поверхности, отображающей поведение целевой функции на множестве значений переменных оптимизации. Этот интервал занимает около 120 вызовов SPS-модели. Третий интервал для $k = 230 \dots 268$ обусловлен доведением уже малого значения целевой функции до значения, удовлетворяющего условиям заданной точности достижения решения. Он может быть изменен опцией работы самой программы оптимизации `fminsearch()`. Анализ особенностей рассмотренного процесса оптимизации вызвал поиск других начальных значений переменных оптимизации, которые бы сократили время решения, обеспечив более благоприятную траекторию изображающей точки решения.

Решение задачи для второго режима полной компенсации реактивной мощности осуществлено при задании значительных начальных значений переменных оптимизации. При этом ожидалась возможность ускоренного прихода к оптимальному решению от режима практически короткого замыкания системы компенсатором реактивной мощности.

С этой целью в качестве начального был выбран вектор $x = [4000, 4000, 4000]$, который соответствует величинам емкостей $C_{ab} = C_{bc} = C_{ca} = 4000$ мкФ.

Соответствующий график зависимости значения N целевой функции от порядкового номера k вызова SPS-модели приведен на рис. 5.

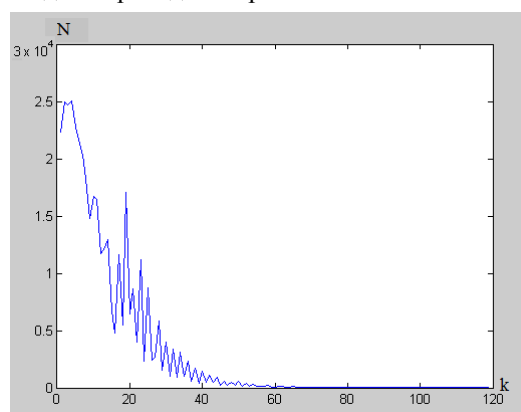


Рис. 5. Зависимость целевой функции N от номера шага k оптимизации при нахождении дополнительного режима полной компенсации

Как видно из графика, количество вызовов SPS-модели сократилось более чем в 2 раза. За 120 вызовов было достигнуто решение, при котором значение целевой функции $N = 0.212$. Фактически же уже за 60 вызовов было достигнуто малое значение N и интервал для $k = 0 \dots 60$ характеризуется непрерывным уменьшением целевой функции и отсутствием горизонтальных участков в графике, как это наблюдается в предыдущем случае. Полученное при этих условиях решение, однако, характеризуется относительно большими значениями переменных оптимизации в точке решения, которые соответствуют следующим значениям емкостей конденсатора:

$C_{ab} = 3935.3$ мкФ; $C_{bc} = 3555.5$ мкФ; $C_{ca} = 3407.7$ мкФ.

На рис. 6 приведены временные диаграммы токов в ЛЭП при указанных параметрах конденсатора. Здесь видно, что токи действительно уравновешены по амплитудам и сдвинуты на 120 эл. град. друг относительно друга при нулевом фазном угле для фазы А. Поэтому коэффициенты мощности, характеризующие работу каждого источника электроэнергии, составляют максимальное единичное значение, что соответствует режиму полной компенсации реактивной мощности в системе.

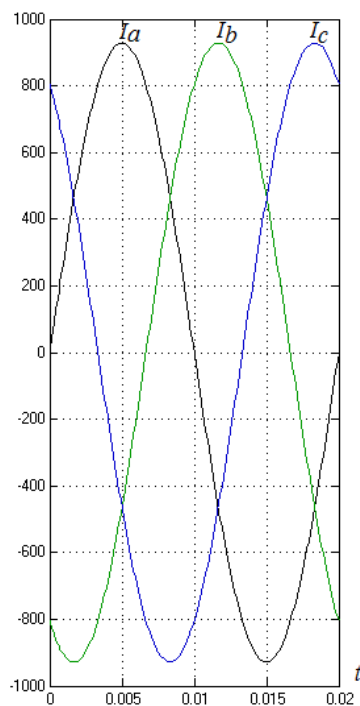


Рис. 6. Временные диаграммы токов в ЛЭП в дополнительном режиме

Найденный второй режим полной компенсации реактивной мощности можно назвать дополнительным, поскольку он характеризуется сверхбольшими значениями амплитуд потребляемых токов. Амплитуды токов в ЛЭП составляют величину 928.4 А. Это более чем на два порядка больше в сравнении с амплитудами 7.754 А для первого основного режима.

В сводной табл. 1 представлено сопоставление системных и режимных параметров, характеризующих оба режима полной компенсации реактивной мощности для рассматриваемой обобщенной трехфазной системы.

Таблица 1
Значения величин системных и режимных параметров в основном и дополнительном режимах

Параметры	Основной режим полной компенсации реактивной мощности	Дополнительный режим полной компенсации реактивной мощности
Емкость конденсатора C_{ab} (мкФ)	562.2	3935.3
Емкость конденсатора C_{bc} (мкФ)	182.3	3555.5
Емкость конденсатора C_{ca} (мкФ)	34.1	3407.7
Амплитуда тока в ЛЭП (А)	7.754	928.4
Амплитуда напряжения на нагрузке (В)	99.25	291.8
Мощность, отдаваемая каждым источником электроэнергии (Вт)	387.7	46420

Касаясь вопроса об адекватности полученных результатов, можно отметить, что существование дополнительного режима полной компенсации, а также его устойчивость, вполне доказывается моделированием на SPS-модели во временной области, где система, являясь диссипативной [9], описывается дифференциальными уравнениями в пространстве переменных состояния [10]. Вопрос о реализации этого режима для рассматриваемого варианта на практике будет осложняться необходимостью установки весьма больших емкостей конденсатора, обеспечением протекания в системе больших токов и т.п. Однако, при определенных параметрах системы точки, характеризующие оба режима полной компенсации, могут оказаться не столь разнесенными по системным и режимным параметрам. В таких случаях практическая значимость предложенного подхода будет состоять в том, что реализация обоих режимов может быть вполне осуществима на практике. Тогда непременно возникнет вопрос о выборе того режима полной компенсации, который характеризуется более рациональными технико-экономическими показателями.

Выводы. Проведенные исследования дают основания утверждать, что метод поисковой оптимизации с использованием SPS-модели показал возможность существования двух режимов полной компенсации реактивной мощности в трехфазной системе электропитания. В терминах теории оптимизации это означает, что в решении задачи полной компенсации отсутствует глобальный оптимум, однако существуют два локальных оптимума. Физически это объясняется неоднозначностью решения задачи синтеза параметров компенсирующего устройства. Моделирование в пространстве состояния подтверждает устойчивость обоих режимов, которые характеризуются максимальным значением коэффициента мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arrillaga J., Watson N.R., Chen S. Power system quality assessment. – John Wiley, 2000. – 300 p.
2. Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E. Power Electronic Control in Electrical Systems. – Newnes, 2002. – 443 p. doi: 10.1016/B978-0-7506-5126-4.X5000-7.

3. Hofmann W., Schlabbach J., Just W. *Reactive Power Compensation: A Practical Guide*. – John Wiley & Sons, 2012. – 274 p.
4. Azzam M., Mousa A.A. Using genetic algorithm and TOPSIS technique for multiobjective reactive power compensation // *Electric Power Systems Research*. – 2010. – vol.80. – no.6. – pp. 675-681. doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.033.
5. Jeon S.-J., Willems J.L. Reactive power compensation in a multi-line system under sinusoidal unbalanced conditions // *International Journal of Circuit Theory and Applications*. – 2011. – vol.39. – no.3. – pp. 211-224. doi: 10.1002/cta.629.
6. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем. – Харьков: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2017. – 170 с.
7. Chapra S.C., Canale R.P. *Numerical methods for engineers*. – McGraw Hill: Higher Education, 2006. – 926 p.
8. Nathews J.H., Fink K.D. *Numerical methods*. – Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001. – 720 p.
9. Friedland B. *Control system design: an introduction to state-space methods* (Dover Books on Electrical Engineering). – Dover Publications Inc. Mineols, New York, 2005. – 620 p.
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: Питер, 2008. – 288 с.

REFERENCES

1. Arrillaga J., Watson N.R., Chen S. *Power system quality assessment*. John Wiley, 2000. 300 p.
2. Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E. *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Newnes, 2002. 443 p. doi: 10.1016/B978-0-7506-5126-4.X5000-7.
3. Hofmann W., Schlabbach J., Just W. *Reactive Power Compensation: A Practical Guide*. John Wiley & Sons, 2012. 274 p.
4. Azzam M., Mousa A.A. Using genetic algorithm and TOPSIS technique for multiobjective reactive power compensation. *Electric Power Systems Research*, 2010, vol.80, no.6, pp. 675-681. doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.033.
5. Jeon S.-J., Willems J.L. Reactive power compensation in a multi-line system under sinusoidal unbalanced conditions. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2011, vol.39, no.3, pp. 211-224. doi: 10.1002/cta.629.
6. Yagup V.G., Yagup E.V. *Primenenie optimizatsionnykh metodov dlia resheniia zadach uluchsheniia pokazatelei elektricheskikh sistem* [The use of optimization methods for solving problems of improving the performance of electrical systems]. Kharkiv, KNAME of A.N. Beketov Publ., 2017. 170 p. (Rus).
7. Chapra S.C., Canale R.P. *Numerical methods for engineers*. McGraw Hill, Higher Education, 2006. 926 p.
8. Nathews J.H., Fink K.D. *Numerical methods*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2001. 720 p.
9. Friedland B. *Control system design: an introduction to state-space methods* (Dover Books on Electrical Engineering). Dover Publications Inc. Mineols, New York, 2005. 620 p.
10. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, Peter Publ., 2008. 288 p. (Rus).

Ягуп Валерий Григорьевич¹, д.т.н., проф.,

Ягуп Екатерина Валериевна¹, д.т.н., доц.,

¹ Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, 61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17, тел/phone +380 57 7073114, e-mail: kata3140@gmail.com

V.G. Yagup¹, E.V. Yagup¹

¹ O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Research of the modes of full compensation of reactive power in a three-phase power supply system.

Introduction The article is devoted to the issues of current balancing and reactive power compensation in a three-phase power supply system. Optimal in all these respects is the mode of full compensation of reactive power, by which we mean such a symmetrical mode, in which only active power is consumed from the source. The task of calculating the mode of full reactive power compensation is non-linear and can be solved using non-linear optimization methods based on the adopted parameters and optimization criteria. **The objective** of the article is to develop a visual model of the power supply system with an unbalanced load, in which current balancing and reactive power compensation is performed using a symmetrical-compensating device, which parameters are determined using search non-linear optimization tools and modern computer mathematics software packages. **The purpose** of the article is to research the modes of full compensation of reactive power in a three-phase power supply system with a linear asymmetric load in order to identify the ambiguity of solving the problem of synthesizing parameters of a reactive power compensator. **Methodology** of research consists in the development of a visual model of a power supply system that feeds unbalanced load. As a symmetrical compensating device, capacitors connected between the phases of the transmission line are used. The model is controlled by a program that launches the model and performs optimization and selection of optimization variable values. The optimization values are the capacitors of the symmetry-compensating device. The optimization criterion is a spherical metric consisting of the reactive powers of each source of electricity. **Results lead** depending on the choice of the initial values of the optimization variables, the optimization process enters two modes of full compensation of reactive power – main and additional. The main mode is characterized by small values of capacitors and small values of currents, and in the additional mode, these values of the system and operational parameters reach extremely large values that are unacceptable for practical use. **Originality** lies in the fact that in terms of optimization theory this means that there is no global optimum in the solution of the problem of full compensation, however, there are two local optimums. Both modes are stable, as evidenced by modeling on the SPS-model of the system in the time domain in the space of state variables. **Practical significance** of the work lies in the fact that when designing a microprocessor system that optimizes the operating mode of the power supply system, it is necessary to envisage the situation of additional mode. References 10, tables 1, figures 6.

Key words: reactive power, reactive power compensator, search optimization, visual model, three-phase power supply system.